

# 1. Elementy elektryczne układów elektronicznych

## 1.1. Elektryczne elementy biernie

### 1.1.1. Rezystory

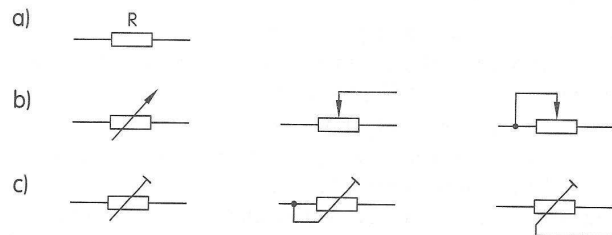
Rezystory są elementami biernymi powszechnie stosowanymi w układach elektronicznych do:

- obciążania elementów aktywnych we wzmacniaczach;
- ustalania wartości prądów roboczych i poziomu sygnałów;
- redukcji napięć;
- ustalania punktów pracy elementów aktywnych;
- ustalania stałych czasowych, w połączeniu z kondensatorem lub cewką;
- pomiarów napięć i rozładowywania kondensatorów po wyłączeniu urządzenia itd.

Rezystory można sklasyfikować, biorąc pod uwagę:

- technologię wykonania: drutowe, warstwowe, objętościowe;
- konstrukcję: nastawne i nienastawne;
- charakterystykę prądowo-napięciową: liniowe i nieliniowe.

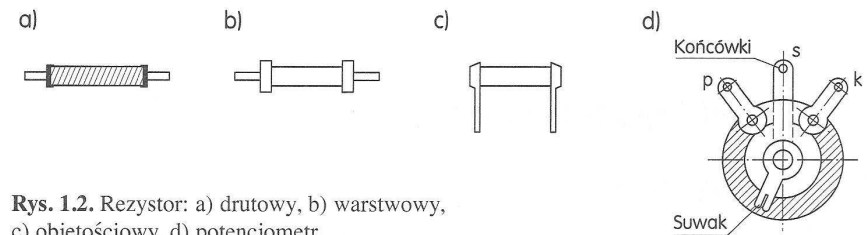
Stosowane symbole rezystorów przedstawiono na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Symbole rezystorów: a) stały, b) zmienny (potencjometr), c) nastawny

**Rezystory drutowe** są wykonywane z drutu oporowego (manganin, konstantan, kanthal, nikielina) nawiniętego na cylinder lub płytkę wykonaną z materiału izolacyjnego (rys. 1.2a). W **rezystorach warstwowych** (rys. 1.2b) materiał oporowy jest

naniesiony na podłoże w postaci warstwy. W zależności od grubości warstwy rozróżnia się rezystory cienkowarstwowe (o grubości warstwy mniejszej niż 1  $\mu\text{m}$ ) i grubowarstwowe. Rezystory cienkowarstwowe są metalizowane, a najczęściej używanym materiałem oporowym jest nichrom (stop niklu i chromu), ale także często wykorzystuje się: złoto, platynę, rod, pallad, nikiel, iryd. Tęgo rodzaju rezystory są stosowane w układach scalonych. Rezystory grubowarstwowe wykonuje się z węgla pyrolitycznego, a ich końce przyłącza się do metalowych pierścieni z końcówkami wyprowadzonymi. Stosuje się je w układach wielkich częstotliwości.



Rys. 1.2. Rezystor: a) drutowy, b) warstwowy, c) objętościowy, d) potencjometr

**Rezystory objętościowe** są budowane z organicznej lub nieorganicznej masy oporowej, w której są zaprasowane wyprowadzenia metalowe (rys. 1.2c). Prąd płynie w nich całą objętością rezystora. Przeznaczone są na ogół do dużych obciążeń i mocy.

Do regulacji poziomu sygnału służą **rezystory nastawne**, zwane **potencjometrami**. Składają się one z elementu izolacyjnego pokrytego masą oporową lub nawiniętego drutem oporowym oraz suwaka przesuwanego się po rezystorze (rys. 1.2d). Potencjometry są budowane w ten sposób, że rezystancja między zaciskiem początkowym a suwakiem zmienia się w zależności od jego położenia albo liniowo (wykorzystywane głównie jako dzielniki napięcia), albo według krzywej logarytmicznej lub wykładniczej (stosowane najczęściej we wzmacniaczach akustycznych do regulacji siły i barwy tonu).

**Rezystory liniowe** to takie, które w normalnych warunkach pracy mają liniową charakterystykę prądowo-napięciową. **Rezystory nieliniowe** nie spełniają tego warunku. Wartość ich rezystancji jest funkcją prądu lub napięcia. Typowymi przykładami rezystorów nieliniowych są *termistory* i *warystory* – elementy półprzewodnikowe, które omówiono w p. 3.1 i 3.2.

Najważniejszymi parametrami rezystorów są:

- **rezystancja znamionowa**, podawana na obudowie elementu; dla rezystorów drutowych najczęściej wynosi  $0,51 \Omega \div 1 \text{ k}\Omega$ , rezystorów warstwowych —  $10 \Omega \div 1 \text{ k}\Omega$ , rezystorów węglowych —  $10 \Omega \div 1 \text{ M}\Omega$ ;
- **tolerancja** (dokładność), z jaką został wykonany rezystor o danej wartości znamionowej, np.  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 5\%$ ,  $\pm 2\%$ ,  $\pm 1\%$ ,  $\pm 0,5\%$ ;
- **moc znamionowa**, równa największej dopuszczalnej mocy możliwej do wydzielienia na rezystorze bez jego uszkodzenia; jej wartość zależy od konstrukcji, zastosowanego materiału i sposobu chłodzenia rezystora;
- **napięcie znamionowe**, odpowiadające największemu napięciu nie powodującemu zmiany właściwości rezystora, a w szczególności jego uszkodzenia; dla większości rezystorów wynosi ono od kilkudziesięciu do kilkuset woltów.

Wartości znamionowe rezystancji seryjnie produkowanych rezystorów odpowiadają kolejnym wyrazom odpowiedniego liczbowego szeregu matematycznego. W tabeli 1.1 podano wartości rezystancji dla przykładowego szeregu E6 i E12.

Znamionowe moce krajowych rezystorów warstwowych i objętościowych są także znormalizowane i wynoszą: 0,05; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 60 W.

Tabela 1.1

**Przykładowy ciąg wartości znamionowych rezystancji i ich tolerancja**

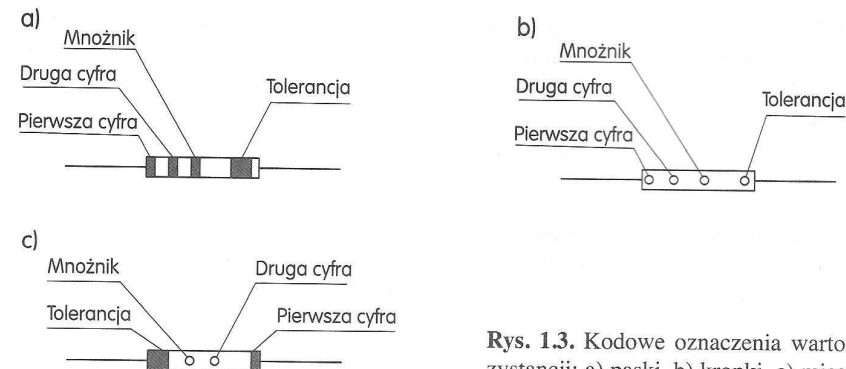
E6 Tolerancja ±20%	10		15		22		33		47		68													
E12 Tolerancja ±10%	10	12	15	18	22	27	33	39	47	56	68	82												
E24 Tolerancja ±5%	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91

Wartość rezystancji jest podawana na rezystorze w postaci znaków. Istnieją dwa sposoby znakowania – kodem barwnym lub literowo-cyfrowym. Kod barwny polega na namalowaniu na rezystorze barwnych pasków, kropek lub ich kombinacji (rys. 1.3).

Tabela 1.2

**Kod barwny rezystorów**

Kolor znaku	Pierwszy pasek (kropka)	Drugi pasek (kropka)	Trzeci pasek (kropka)	Czwarty pasek (kropka)
	pierwsza cyfra	druga cyfra	mnożnik	tolerancja, %
Srebrny	–	–	$10^{-2}$	10
Złoty	–	–	$10^{-1}$	5
Czarny	–	0	1	–
Brązowy	1	1	10	1
Czerwony	2	2	$10^2$	2
Pomarańczowy	3	3	$10^3$	–
Żółty	4	4	$10^4$	–
Zielony	5	5	$10^5$	–
Niebieski	6	6	$10^6$	–
Fioletowy	7	7	–	–
Szary	8	8	–	–
Biały	9	9	–	–



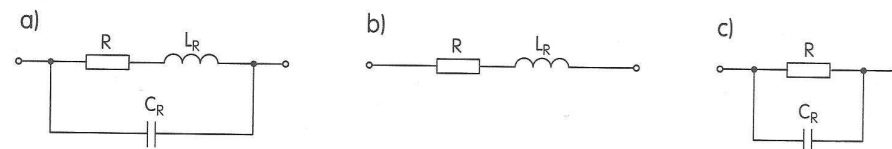
**Rys. 1.3.** Kodowe oznaczenia wartości rezystancji: a) paski, b) kropki, c) mieszany

Pierwszy pasek (kropka) umieszczony najbliżej czoła rezystora określa pierwszą cyfrę, drugi pasek (kropka) – drugą cyfrę, trzeci pasek (kropka) – mnożnik, ostatni pasek (kropka) – podwójnej niż poprzednie szerokości – oznacza tolerancję. W tabeli 1.2 przedstawiono kod barwny znakowania rezystorów.

**PRZYKŁAD 1.1**

Na rezystorze są paski namalowane w następującej kolejności: niebieski, szary, czerwony, srebrny. Oznacza to, że jego wartość znamionowa wynosi 6,8 kΩ z tolerancją ±10%. W kodzie literowo-cyfrowym wartość ta będzie zapisana jako 6k8. Zapis 6M8 odpowiada wartości 6 800 000 Ω, a zapis tylko cyframi 68 – odpowiada wartości 68 Ω.

Rezystor zastosowany w obwodzie prądu zmiennego wykazuje oprócz rezystancji także indukcyjność i pojemność, które mają tym większy wpływ, im większa jest częstotliwość prądu. Na rysunku 1.4 przedstawiono schemat zastępczy rezystora uwzględniający jego indukcyjność  $L_R$  i pojemność  $C_R$ . Na ogół rezystory o małych rezystancjach (mniejszych niż 1 kΩ) i w zakresie małych częstotliwości mają charakter indukcyjny (rys. 1.4b). Schemat zastępczy rezystora o dużej rezystancji znamionowej (większej niż 100 kΩ) i pracującego w układach wielkiej częstotliwości należy przyjmować zgodnie z rys. 1.4c.



**Rys. 1.4.** Schemat zastępczy rezystora: a) uwzględniający indukcyjność  $L_R$  i pojemność  $C_R$ , b) o małej rezystancji w zakresie małych częstotliwości, c) o dużej rezystancji w zakresie wielkich częstotliwości

## 1.1.2. Kondensatory

Kondensatory można podzielić ze względu na:

- rodzaj napięcia pracy: stałonapięciowe (w obwodach napięcia stałego), zmiennonapięciowe (w obwodach napięcia zmiennego), impulsowe (w obwodach impulsowych o większych wartościach prądów ładowania i rozładowania);
- pojemność: stała — wartość pojemności jest stała, zmienna — wartość pojemności jest nastawna;
- rodzaj użytego dielektryka: mikowe (o symbolu KM), ceramiczne (KCP, KFP, KCR, KFR), papierowe (KLMP, KSMP), z tworzyw sztucznych (KSF, MKSE, MKSF, MKSP), elektrolityczne (KEN, KEO, SM, E, T, UL, KERMS), powietrzne.

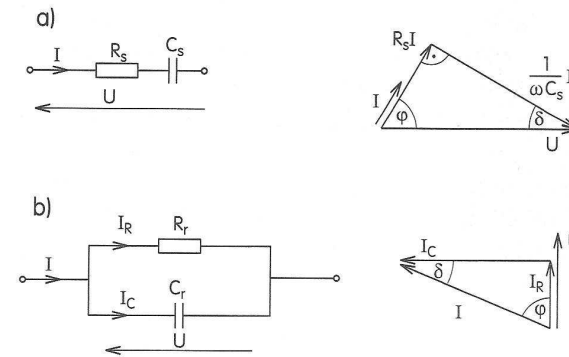
Podstawowymi parametrami kondensatorów są:

- pojemność elektryczna znamionowa  $C_N$  — podawana na obudowie kondensatora, o wartościach odpowiadających wyrazom szeregu matematycznego (E6 lub E12 — patrz tab. 1.1);
- napięcie znamionowe  $U_N$ , z określeniem jego rodzaju (stałe, zmienne, impulsowe);
- współczynnik stratności  $\text{tg } \delta$  — podawany dla częstotliwości 1 kHz i 1 MHz (wartość tego współczynnika zależy silnie od częstotliwości);
- temperaturowy współczynnik pojemności  $\alpha_C$  — określający wpływ temperatury na zmianę pojemności.

Kondensatory, podobnie jak rezystory, mogą być oznaczane kodem cyfrowym, literowo-cyfrowym lub barwnym. W oznaczaniu cyfrowym podaje się najczęściej wartości znamionowe pojemności i napięcia oraz tolerancję. W oznaczeniach literowo-cyfrowych litery określają dodatkowo rodzaj zastosowanego dielektryka. W kodzie barwnym pierwszy pasek oznacza pierwszą cyfrę wartości pojemności, drugi — drugą cyfrę wartości pojemności, trzeci — mnożnik dziesiętny, czwarty — tolerancję wyrażoną w procentach, piąty — temperaturowy współczynnik pojemności, a szósty — napięcie znamionowe.

Podstawowe parametry kondensatora o stałej pojemności zależą przede wszystkim od rodzaju zastosowanego dielektryka. W kondensatorach o zmiennej pojemności dielektrykiem może być powietrze (symbol kondensatora: AM, FM). Są one wykonywane w postaci zestawu płytek (ruchomych i nieruchomych), z możliwością zmiany ich wzajemnego położenia przez obrót płytek ruchomych. Zmiana pojemności zależy od kształtu obrotowych płytek. Zależność pojemności od kąta obrotu jednej płytki względem drugiej jest najczęściej nieliniowa (np. logarytmiczna). Kondensatory o takiej charakterystyce są stosowane w nadajnikach i odbiornikach radiowych, aparaturze pomiarowej. Prostoliniową zależność zmian pojemności od kąta obrotu płytek mają kondensatory dostrojcze (trymery) stosowane w elektronicznych układach dostrajania.

Kondensator rzeczywisty w zakresie małych częstotliwości traktuje się jako układ rezystancyjno-pojemnościowy o szeregowo lub równoległe połączonych elementach  $R$  i  $C$  (rys. 1.5).



**Rys. 1.5.** Schematy zastępcze kondensatora i wykresy wektorowe napięć i prądów w zakresie małych częstotliwości:  
a) układ szeregowy,  
b) układ równoległy

Występujące na schematach rezystancje  $R_s$  i  $R_r$  reprezentują straty w dielektryku. Kondensatorom o małych stratach odpowiada schemat z rys. 1.5a, a kondensatorom o dużych stratach — schemat z rys. 1.5b. Miarą strat w kondensatorze jest współczynnik stratności, często zwany także tangensem kąta stratności  $\text{tg } \delta$ . Kąt stratności  $\delta = 90^\circ - \varphi$ , przy czym  $\varphi$  jest kątem między wektorami napięcia i prądu. Odpowiednio do schematu zastępczego współczynnik stratności jest definiowany:

– dla układu szeregowego

$$\text{tg } \delta = \omega C_s R_s \quad (1.1a)$$

– dla układu równoległego

$$\text{tg } \delta = \frac{1}{\omega C_r R_r} \quad (1.1b)$$

Impedancja kondensatora zmniejsza się wraz ze zwiększeniem częstotliwości pracy. Ta właściwość kondensatora jest wykorzystana do zwierania (przez bocznikowanie) w układach elektronicznych sygnałów zakłócających o wielkiej częstotliwości. Wartość pojemności kondensatora jest dobierana tak, aby jego impedancja dla określonych częstotliwości była dużo mniejsza niż impedancja bocznikowanego przez kondensator elementu\*.

Kilka innych przykładów zastosowania kondensatorów w energoelektronice:

- w obwodach rezonansowych, gdzie wraz z cewką indukcyjną i rezystorem stanowią obwód rezonansowy;
- w zasilaczach do magazynowania energii i filtrowania (wygładzania) napięcia stałego.

\* Wykorzystuje się to np. we wzmacniaczach napięcia

### 1.1.3. Cewki indukcyjne

W układach elektronicznych cewki indukcyjne są stosowane powszechnie w obwodach rezonansowych, różnego rodzaju filtrach, jako elementy sprzęgające w układach małej i wielkiej częstotliwości.

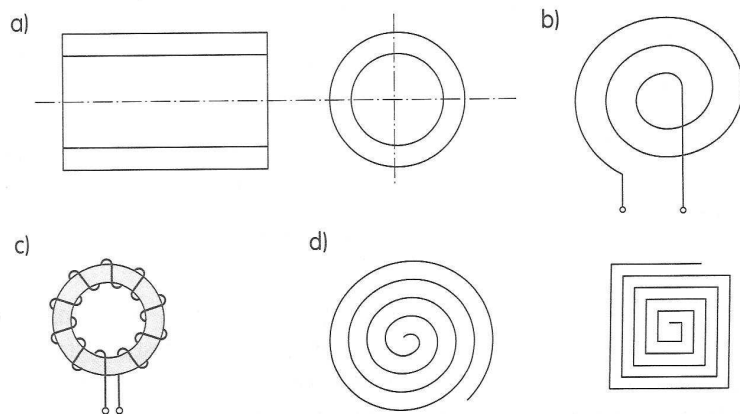
Rozróżnia się dwa zasadnicze typy układów cewek indukcyjnych:

1. Układ jednej cewki, której dominującym parametrem jest jej indukcyjność własna  $L$ .
2. Układ dwóch cewek sprzężonych magnetycznie, których głównym parametrem, oprócz indukcyjności własnych  $L_1$  i  $L_2$ , jest także indukcyjność wzajemna  $M = k\sqrt{L_1L_2}$ , gdzie  $k$  jest współczynnikiem sprzężenia magnetycznego (patrz p. 5.7 cz. 1 podręcznika).

Ze względu na sposób wykonania rozróżniamy cewki:

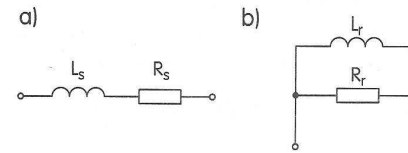
- jednowarstwowe, wielowarstwowe, drukowane;
- bezrdzeniowe (magnetowodem jest powietrze) lub rdzeniowe (nawinięte na ferromagnetyczny rdzeń);
- cylindryczne, płaskie, toroidalne.

Cewki indukcyjne w tradycyjnym wykonaniu buduje się jako cylindryczne, nawijane jedno- lub wielowarstwowo. Indukcyjność cewek jednowarstwowych zwykle mieści się w przedziale  $15 \div 20 \mu\text{H}$ , a wielowarstwowych jest odpowiednio większa. Cewki drukowane są wykonywane jako układ odpowiednio wyprofilowanych ścieżek nanoszonych specjalną techniką na cienkowarstwową płytkę. Ich indukcyjności własne mają niewielkie wartości ( $2 \div 50 \mu\text{H}$ ). Cienkowarstwowe indukcyjności wzajemne uzyskuje się z cewek uformowanych w sąsiednich warstwach płytek. Na rys. 1.6 pokazano przykładowe sposoby wykonania cewek.



**Rys. 1.6.** Przykładowe kształty cewek indukcyjnych: a) cylindryczna o przekroju kołowym, b) płaska, c) toroidalna, d) cienkowarstwowe – spiralna i kwadratowa

W rzeczywistych cewkach, oprócz indukcyjności, należy uwzględnić ich rezystancję oraz pojemność, jaka występuje między poszczególnymi zwojami cewki, zwojami a korpusem i innymi elementami otaczającymi cewkę. Wpływ poszczególnych parametrów zależy od częstotliwości pracy cewki. W zakresie małych częstotliwości i przy małej amplitudzie indukcji magnetycznej cewce przypisuje się jeden z układów zastępczych pokazanych na rys. 1.7.



**Rys. 1.7.** Schematy zastępcze cewki w zakresie małych częstotliwości: a) szeregowy, b) równoległy

Pokazane na schematach rezystory  $R_s$  i  $R_r$  reprezentują rezystancje uzwojeń (z uwzględnieniem zjawiska naskórkowości), rezystancję w przewodach doprowadzających oraz straty mocy występujące w rdzeniu cewki (na przemagnesowywanie i prądy wirowe). Parametrem charakteryzującym cewkę, oprócz jej zastępczych indukcyjności  $L_s$  lub  $L_r$ , jest dobroć  $Q_L$  definiowana odpowiednio dla schematów zastępczych:

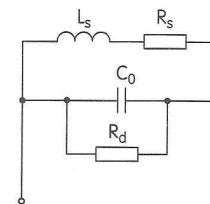
— dla szeregowego

$$Q_L = \frac{\omega L_s}{R_s} \quad (1.2a)$$

— dla równoległego

$$Q_L = \frac{R_r}{\omega L_r} \quad (1.2b)$$

W zakresie wielkich częstotliwości cewce indukcyjnej odpowiada schemat zastępczy przedstawiony na rys. 1.8.



**Rys. 1.8.** Schemat zastępczy cewki w zakresie wielkich częstotliwości

Występująca na schemacie pojemność  $C_0$  jest zastępczą pojemnością własną cewki (o wartości w granicach  $0,5 \div 50 \text{ pF}$ ), a rezystancja  $R_d$  jest rezystancją zastępczą, odpowiadającą stratom mocy w dielektryku kondensatora  $C_0$ . Pojemność i indukcyjność własna cewki tworzą obwód rezonansowy. Wartość pojemności  $C_0$  wpływa na częstotliwość rezonansu własnego cewki opisaną wzorem:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_0}} \quad (1.3)$$

Przy zwiększaniu częstotliwości pracy do wartości większej niż określona zależnością (1.3) zaznacza się pojemnościowy charakter cewki indukcyjnej. Nieuwzględnienie pojemności cewki w obliczeniach projektowych układu elektronicznego może stwarzać duże problemy, zwłaszcza przy większych częstotliwościach.

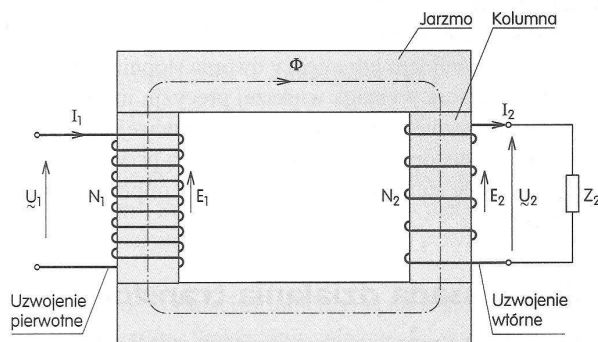
## 1.2. Transformatory

**Transformatory** przetwarzają energię elektryczną o parametrach  $U_1, I_1$  na energię elektryczną o parametrach  $U_2, I_2$ , przy niezmięnionej częstotliwości.

Są one stosowane w układach do przesyłu energii na znaczne odległości (transformatory trójfazowe), ale także w elektronice i technice pomiarowej (transformatory jednofazowe, przekładniki). W elektronice nabrały ogromnego znaczenia ze względu na możliwość galwanicznego oddzielenia dwóch obwodów elektrycznych, ale z możliwością wzajemnego ich oddziaływania na siebie dzięki sprzężeniu magnetycznemu. Nie bez znaczenia jest możliwość dopasowania napięcia w obu obwodach, przykładowo – napięcia ogólnie dostępnej sieci elektroenergetycznej nn – niskiego napięcia (230/400 V) do możliwości napięciowych elementów i układów elektronicznych (np. 15 V).

### 1.2.1. Budowa transformatora

Transformator jednofazowy (zasilany z sieci jednofazowej) składa się z ferromagnetycznego rdzenia stalowego, stanowiącego zamknięty obwód magnetyczny oraz umieszczonych na nim uzwojeń pierwotnego i wtórnego, oddzielonych od siebie galwanicznie (rys. 1.9).



Rys. 1.9. Budowa transformatora jednofazowego

Uzwojenie, do którego jest doprowadzona energia elektryczna, nazywa się **uzwojeniem pierwotnym**, a uzwojenie, z którego jest pobierana energia, **uzwojeniem wtórnym**. Uzwojenie o większej liczbie zwojów  $N_1$  nosi nazwę uzwojenia górnego napięcia, a o mniejszej liczbie zwojów  $N_2$ , **uzwojenia dolnego napięcia**.

W transformatorach podwyższających napięcie uzwojenie pierwotne jest uzwojeniem dolnego napięcia, uzwojenie wtórne zaś – uzwojeniem górnego napięcia. W transformatorach obniżających napięcie jest odwrotnie.

Rdzeń magnetyczny jest ośrodkiem sprzęgającym magnetycznie oba uzwojenia transformatora. Ze względu na dużą przenikalność magnetyczną stal jest bardzo dobrym przewodnikiem strumienia magnetycznego.

Reluktancja (opór magnetyczny) tego obwodu magnetycznego nie jest zbyt duża. W celu ograniczenia strat magnetycznych (od prądów wirowych i histerezy) rdzeń transformatora jest wykonany z pakietu izolowanych między sobą blach stalowych, silnie nakrzemionych (tzw. blacha transformatorowa). Pionowe części rdzenia, na których są nawinięte uzwojenia, noszą nazwę **kolumn**, a poziome, łączące kolumny to jarzma (rys. 1.9). Gdy są wymagane duże sprzężenia magnetyczne, a transformatory mają być objętościowo małe, rdzeń jest wykonywany z jednolitego materiału – permaloju (specjalnej stali magnetycznej o bardzo dużej przenikalności magnetycznej).

Powietrze również może być ośrodkiem, za pomocą którego są sprzęgnięte magnetycznie dwa uzwojenia. Jest ono jednak dużo gorszym przewodnikiem strumienia magnetycznego, co daje ograniczone efekty transformacji energii, w porównaniu z zastosowaniem rdzenia stalowego.

Transformatory stosowane w układach elektronicznych mają różne konstrukcje ze względu na spełniane funkcje. Znaczną grupę stanowią transformatory sieciowe, których zadaniem jest dopasowanie napięcia sieci elektroenergetycznej 230 V do napięcia układu elektronicznego, np. 9/12/24 V. Transformatory te stosuje się w zasilaczach i prostownikach. Najczęściej są one jednofazowe, ale mogą być też trójfazowe.

Transformatory małej częstotliwości (akustyczne) spełniają zadanie różniące się zasadniczo od zadań transformatorów sieciowych. Wykorzystuje się je nie w celu transformowania napięcia, ale w celu dopasowania impedancji, np. między wzmacniaczem a głośnikiem lub między dwoma stopniami wzmacniacza. Konstrukcja takiego transformatora wymaga większej precyzji, musi on bowiem pracować poprawnie w szerokim pasmie częstotliwości sygnałów wejściowych (20 Hz ÷ 20 kHz), bez ich tłumienia. Transformatory sieciowe pracują przy stałej częstotliwości 50 Hz.

Budowane są również transformatory impulsowe na częstotliwości ok. 100 kHz i większe.

### 1.2.2. Zasada działania transformatora

Jeżeli uzwojenie pierwotne transformatora jednofazowego zasilimy napięciem przemienicznym sinusoidalnym, to popłynie w nim prąd, który wytworzy zmienny w czasie główny strumień magnetyczny  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ , zamykający się w rdzeniu transformatora. Strumień ten indukuje w obu uzwojeniach (pierwotnym i wtórnym) siły elektromotoryczne; siły te – przy pominięciu spadków napięć na uzwojeniach – są równe odpowiednio:

$$\begin{aligned} E_1 &= U_1 = 4,44N_1f\Phi_m \\ E_2 &= U_2 = 4,44N_2f\Phi_m \end{aligned} \quad (1.4)$$



Należy zaznaczyć, że warunkiem koniecznym do zaindukowania się napięcia w uzwojeniu wtórnym jest przepływ zmiennego strumienia magnetycznego w rdzeniu transformatora. Zmienny strumień pojawi się tylko wówczas, gdy uzwojenie pierwotne transformatora będzie zasilone napięciem zmiennym. Doprowadzenie napięcia stałego do uzwojenia pierwotnego transformatora spowoduje przepływ w rdzeniu strumienia stałego w czasie. Pod wpływem takiego strumienia na zaciskach uzwojenia wtórnego nie pojawi się napięcie. Tę własność transformatora będziemy wykorzystywać we wzmacniaczach do blokowania składowej stałej sygnałów.

Stosunek napięć strony pierwotnej i wtórnej  $K$ , równy w przybliżeniu stosunkowi zwojów obu uzwojeń  $n$ , jest parametrem charakterystycznym transformatora i nosi nazwę **przekładni napięciowej** (wzór 1.5).

$$K = \frac{U_1}{U_2} \approx n = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.5)$$

Stosunek prądów strony pierwotnej i wtórnej jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalny do przekładni napięciowej:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{1}{K} \quad (1.6)$$

W pracy transformatora można wyróżnić trzy zasadnicze stany: **jałowy**, **obciążenia** i **zwarcia**.

**Stan jałowy** transformatora występuje wówczas, gdy jego uzwojenie pierwotne jest przyłączone do sieci prądu przemiennego o znamionowym napięciu  $U_1$  i częstotliwości  $f$ , a uzwojenie wtórne pozostaje rozwarte, prąd wtórny  $I_2 = 0$ .

Moc czynna pobierana przez transformator w stanie jałowym

$$P_o = U_1 I_{10} \cos \varphi_{10} \quad (1.7)$$

jest zużywana głównie na pokrycie strat mocy w rdzeniu magnetycznym, spowodowanych histerezą i prądami wirowymi. Straty mocy w uzwojeniu pierwotnym są pomijalnie małe z powodu małej wartości prądu  $I_{10}$ , zwanego w tym przypadku **prądem jałowym**.

Straty w żelazie  $\Delta P_{Fe}$ , zależne od wartości strumienia, są takie same w stanie jałowym jak przy obciążeniu transformatora. Praktycznie cała moc  $P_o$  w stanie jałowym pobierana z sieci idzie na pokrycie strat w żelazie. Moc ta dzieli się na straty na histerezę  $\Delta P_h$  i straty na prądy wirowe  $\Delta P_w$ , w różnym stopniu zależne od częstotliwości  $f$  napięcia zasilającego:

$$P_o \approx \Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_w = k_h B_m^2 f + k_w B_m^2 f^2 \quad (1.8)$$

gdzie:  $k_h, k_w$  – współczynniki proporcjonalności;  $B_m$  – amplituda indukcji magnetycznej w rdzeniu.

Transformatory sieciowe są zasilane z sieci elektroenergetycznej o stałej częstotliwości ( $f = \text{const}$ ), a ponieważ indukcja magnetyczna w rdzeniu jest proporcjonalna do napięcia, zatem straty w rdzeniu są zależne od kwadratu napięcia zasilającego uzwojenie pierwotne

$$\Delta P_{Fe} = k U_1^2 \quad (1.9)$$

Współczynnik mocy  $\cos \varphi_{10}$  jest bardzo mały, wynosi ok. 0,1 przy napięciu znamionowym, co jest niekorzystne dla pracy sieci elektroenergetycznej.

Ze stanem jałowym transformatora mamy do czynienia w przypadku pracy nieobciążonych zasilaczy do ładowania akumulatorów drobnego sprzętu elektronicznego, np. telefonów komórkowych, kalkulatorów. Jeśli pozostawimy zasilacz w gniazdku sieciowym, a nie jest on obciążony, to pobiera z sieci energię elektryczną, która w całości jest tracona w obwodzie magnetycznym transformatora zasilacza, powodując niepotrzebne jego nagrzewanie.

**Stan obciążenia** występuje wówczas, gdy do zacisków wtórnych transformatora jest przyłączony odbiornik energii elektrycznej. Jest to stan normalnej pracy urządzenia.

Przy zwiększającym się obciążeniu (wzroście liczby przyłączonych odbiorników) zwiększa się prąd  $I_2$  w uzwojeniu wtórnym, powodując większe straty mocy. Straty mocy w uzwojeniach zależą od obciążenia

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} = R_{Cu1} I_1^2 + R_{Cu2} I_2^2 \quad (1.10)$$

gdzie:  $\Delta P_{Cu1}, \Delta P_{Cu2}$  – odpowiednio straty mocy w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym;  $R_{Cu1}, R_{Cu2}$  – odpowiednio rezystancje uzwojeń pierwotnego i wtórnego.

Całkowite straty mocy w transformatorze są sumą strat mocy w rdzeniu i w uzwojeniach

$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu} \quad (1.11)$$

**Sprawność transformatora** jest wyrażona stosunkiem mocy czynnej oddawanej przez uzwojenie wtórne do mocy czynnej pobieranej przez uzwojenie pierwotne

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \quad (1.12)$$

**Mocą znamionową transformatora** jest moc pozorna oddawana przez uzwojenie wtórne

$$S_N = U_{2N} I_{2N} \quad (1.13)$$

a jej jednostką jest woltoamper (VA).

Ze **stanem zwarcia** mamy do czynienia wówczas, gdy w czasie zasilania uzwojenia pierwotnego zwarte są zaciski uzwojenia wtórnego. Jeżeli napięcie

zasilające uzwojenie byłoby równe napięciu znamionowemu, to prądy w uzwojeniach osiągnęłyby w stanie zwarcia, wartości  $20 \div 30$  razy większe niż prądy znamionowe. Jest to wyjątkowo niekorzystny stan, do którego nie wolno dopuścić z uwagi na uszkodzenie transformatora.

## Pytania i zadania kontrolne

---

1. Omów zastosowania rezystorów w układach elektronicznych.
2. Dokonaj klasyfikacji rezystorów ze względu na technologię wykonania, konstrukcję i charakterystyki prądowo-napięciowe.
3. Wymień parametry katalogowe rezystorów.
4. Wyjaśnij zasady znakowania rezystorów.
5. Omów schematy zastępcze rezystora i wyjaśnij, kiedy się je stosuje.
6. Dokonaj klasyfikacji kondensatorów.
7. Co określa współczynnik stratności kondensatora?
8. Omów schematy zastępcze kondensatora.
9. Czy kondensator elektrolityczny można włączyć w obwód prądu zmiennego?
10. Wymień i omów parametry kondensatora.
11. Omów rodzaje cewek indukcyjnych.
12. Która z cewek ma większą indukcyjność: nawinięta na rdzeń ferromagnetyczny, czy nawinięta na rdzeń porcelitowy? Odpowiedź uzasadnij.
13. Omów schematy zastępcze cewki indukcyjnej.
14. Podaj i wyjaśnij, co to jest dobroć cewki.
15. Wyjaśnij, do czego służy transformator.
16. Czy transformator może przetwarzać energię prądu stałego? Odpowiedź uzasadnij.
17. Omów budowę i zasadę działania transformatora jednofazowego.
18. Podaj definicję przekładni napięciowej transformatora.
19. Jaki wpływ na straty mocy w transformatorze ma częstotliwość napięcia zasilającego?
20. Czy transformator nieobciążony na wyjściu pobiera moc z sieci? Odpowiedź uzasadnij.